

0 7 2 3 4 2 2 - 1

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

на правах рукописи

**Коваленко Илья Геннадьевич**

**Ударные и нелинейные волны  
в гравитирующих средах**

Специальность 01.03.02 — астрофизика и радиоастрономия

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Санкт-Петербург 2001

Работа выполнена в Волгоградском государственном университете

**Официальные оппоненты:**

доктор физико-математических наук, профессор Бисноватый-Коган Г.С.  
доктор физико-математических наук, профессор Быков А.М.  
доктор физико-математических наук, профессор Горбацкий В.Г.

**Ведущая организация:**

Институт астрономии Российской академии наук

Защита состоится "11 - октября 2001 г. в 14<sup>00</sup> на заседании диссертационного совета Д 212.232.15 по защите диссертаций на соискание ученой степени доктора наук в Санкт-Петербургском государственном университете по адресу:

198504 Санкт-Петербург, Петродворец, Библиотечная пл. 2, ауд. 2143 (математико-механический факультет).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского государственного университета.

Автореферат разослан "09 - августа 2001 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

В.В. Орлов

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА  
КФУ



## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность проблемы.**

Ударные волны играют центральную роль в динамике крупномасштабных движений и в процессах образования структур в пространстве около звезд, в межзвездной галактической среде и в межгалактическом пространстве. Наряду с этим ударные волны участвуют в процессах массообмена между различными фазами межзвездной среды, им отводится главная роль в процессах генерации космических лучей, с ними также тесно связаны процессы звездообразования.

Интенсивное развитие астрономии в различных диапазонах длин волн и, в том числе, развитие внеатмосферной астрономии в последние годы позволило накопить богатый материал наблюдательных данных о проявлениях и свойствах ударных волн в самых разных астрофизических системах. Осмысление имеющихся данных, их физическая интерпретация требует разработки новых, адекватных гидродинамических моделей. Это делает теоретическое исследование динамики ударных волн актуальным, что подтверждается резко возросшей интенсивностью исследований в этом направлении в течение последних двух десятилетий.

Основными факторами, определяющими динамику ударных волн в космической среде, служат неоднородность и нестационарность среды. Последние, в свою очередь, обуславливаются балансом сил, действующих на вещество. Разреженность межзвездного и межгалактического вещества и прозрачность к собственному излучению приводит его к быстрому остыванию, вследствие чего с уменьшением температуры падает и вклад сил давления газа в общий баланс сил. В результате движение газа оказывается существенно сверхзвуковым, таким образом, в общем балансе сил доминирующую роль начинает играть гравитационное поле.

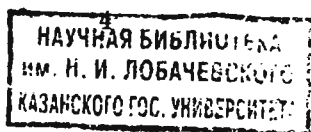
Проявления воздействия гравитационных сил на ударные волны

в астрофизических системах весьма разнообразны. Гравитационное поле может выступать не только как фактор, управляющий динамикой ударных волн, но и как источник самих волн.

В дисковых газовых системах причиной появления протяженных ударных волн, простирающихся вдоль всего диска, служит аксиальная неоднородность гравитационного потенциала, в поле которого вращается диск. Ударные волны в галактиках инициируются полем спиральных рукавов, бара или приливным воздействием галактического спутника или пролетной галактики при тесном сближении [1-3]. Неустойчивости галактических ударных волн отводится организующая роль. Проявление мелкомасштабной неустойчивости связывается с формированием облачной компоненты за фронтом галактической ударной волны [4,5]. С неустойчивостью положения ударной волны в гравитационной потенциальной яме спирального рукава, возможно, связаны структурные особенности рукавов, такие как изломы, разделяющие рукава на отдельные плоские сегменты [6,7].

Аналогичные по своей природе крупномасштабные ударные волны могут возникать в аккреционных дисках вокруг компактных объектов. В аккреционных дисках в тесных двойных системах ударные волны должны образовываться под влиянием гравитационного поля компаньона [8,9]. Такие ударные волны могут исполнять роль эффективного механизма перераспределения углового момента, роль, которая ранее обычно отводилась турбулентной вязкости. Ударные волны в аккреционных дисках могут возникать и при падении вращающегося вещества на центр и отражении от центробежного барьера [10]. С неустойчивостью ударных волн в аккреционных дисках связывается наличие квазипериодических пульсаций светимости в двойных системах, наблюдаемых в рентгеновском диапазоне [11].

Возможно, ударные волны развиваются и в полярных кольцах, вращающихся в асферическом гравитационном поле галактического звездного диска под некоторым углом к плоскости диска галактики [12].



**Цель работы** состояла в исследовании динамических и структурных особенностей ударных и нелинейных волн в средах, влияние на которых гравитационного поля является определяющим. Конкретно были поставлены следующие задачи: 1) исследование характера взаимодействия и структурных особенностей течения межзвездного газа с гравитационным полем звездной спиральной волны плотности в плоской галактике, определение условий возникновения и областей локализации галактической ударной волны; 2) построение квазидвумерной модели газодинамики тонких астрофизических газовых дисков, корректно учитывающей инерцию вертикальных движений и переменность толщины дисков; 3) исследование устойчивости галактических ударных волн, построение резонансной теории неустойчивости ударных волн в неоднородной среде; 4) анализ устойчивости сферической аккреции газа на компактный гравитирующий объект в различных режимах аккреции; 5) исследование динамики взаимодействия облаков межзвездного газа с горячим межоблачным газом и внешним прогревающим излучением; 6) исследование процесса развития под действием гравитационной неустойчивости локализованных структур в расширяющейся вселенной, классификация образующихся структур.

На защиту выносятся следующие **основные положения и результаты**:

1. Стационарная модель протекания газа через гравитационную яму.
2. Иерархический метод, позволяющий описывать квазидвумерным образом динамику тонких газовых дисков с учетом влияния эффектов реальной трехмерности дисков.
3. Резонансная теория неустойчивости ударных волн в неоднородных средах и методика расчета коэффициентов отражения и трансформации звука на ударном фронте в неоднородной среде.
4. Результаты линейного анализа устойчивости ударных волн в плоской и сферической моделях протекания газа через гравитационную

потенциальную яму, а также с учетом процессов быстрой тепловой релаксации вещества к тепловому равновесию.

5. Результаты линейного анализа устойчивости сферического аккреционного течения газа на точечный гравитирующий объект.
6. Результаты расчетов имплозии межзвездных облаков, подверженных нагреву внешним ультрафиолетовым излучением или теплопроводностью.
7. Критерий гравитационной неустойчивости волновых пакетов в расширяющейся вселенной.
8. Результаты исследования динамики уединенных возмущений в расширяющейся вселенной.

### **Научная новизна работы.**

В работе исследованы структурные особенности стационарного течения межзвездного газа с ударной волной в гравитационном поле спиральной волны плотности в звездной подсистеме плоской галактики.

Предложен новый метод квазидвумерного гидродинамического описания тонких астрофизических газовых дисков, корректно учитывающий инерцию вертикальных движений вещества в диске, переменность толщины диска, многомодовость колебательных движений в диске, произвольное уравнение состояния вещества в диске. На основе данного метода исследовано влияние конечности толщины дисков на структуру стационарных нелинейных и ударных волн в тонких газовых дисках.

Развита резонансная теория неустойчивости ударных волн в неоднородных средах, позволяющая выявлять гидродинамические механизмы, приводящие к неустойчивости ударной волны в конкретных моделях течения. Введен коэффициент отражения (трансформации) звука на фронте ударной волны в неоднородном потоке, что позволяет определять условия спонтанного излучения фронтом неустойчивых колебаний и прогнозировать свойства устойчивости ударной волны в конкрет-

ных моделях течения.

В работе впервые исследована устойчивость сферического аккреционного течения на точечный гравитирующий источник по отношению к вынужденным колебаниям. Обнаружена возможность эффективной термализации течения в случае сферической безударной аккреции.

Уточнен критерий гравитационной неустойчивости возмущений в расширяющейся вселенной на случай локализованных возмущений конечных размеров. Выполнен подробный анализ и дана классификация структур, образующихся в ходе развития произвольных уединенных возмущений в расширяющейся вселенной.

### **Научная и практическая ценность работы.**

Построенная в диссертации модель взаимодействия газа с гравитационной ямой используется в различных научных центрах при интерпретации наблюдательных данных, в частности, для объяснения образования ударных волн в газовом галактическом гало, в полярных кольцах, а также для объяснения особенностей строения спирального узора плоских галактик.

Результаты анализа устойчивости аккреционных течений дают возможность объяснения наблюдаемых особенностей одиночных компактных объектов – активных галактических ядер, квазаров, внегалактических черных дыр.

Развитый резонансный подход к анализу устойчивости ударных волн может быть использован при решении различных задач газодинамики ударных волн в неоднородных средах.

Полученные в диссертации результаты используются в теоретических исследованиях физики галактик, физики аккреционных систем, физики межзвездной среды в ГАИШ МГУ, ИНАСАН, ИКИ РАН, РГУ, ВолГУ, а также в ряде научных центров в США, Франции, Японии.

**Апробация.** Результаты работы докладывались на семинарах кафедры Теоретической физики и волновых процессов ВолГУ, на астро-

физических семинарах в Ростовском и Санкт-Петербургском госуниверситетах, Институте астрономии РАН, Институте космических исследований РАН, Институте проблем механики РАН, Институте теоретической и экспериментальной физики РАН, Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН, обсерватории Медон (Франция), Высшей нормальной школе г. Лион (Франция), университетах Принстона и Кента (США), на 2-й Всесоюзной конференции “Классическая гравифизика” (Волгоград, 1989), на Всесоюзной конференции “Астрофизика сегодня” (Нижний Новгород, 1991), на Всероссийском семинаре “Нелинейность и самоорганизация в астрофизике” (Пулково, 1992), на конференции “Physics of Gaseous and Stellar Discs of Galaxy” (Нижний Архыз, 1993), на совещании рабочей группы “Физика межзвездной среды” (Пушино, 1995), на конференции “Structure and Evolution of Stellar Systems” (Петрозаводск, 1995), на конференции “Актуальные проблемы астрофизики” (Москва, 1996), на съездах Европейского астрономического общества (Катания, Италия, 1995; Прага, Чехия, 1998; Москва, 2000), на IV съезде Евразийского астрономического общества (Москва, 1997), на конференции Тихоокеанского астрономического общества Pacific Rim Conference on Stellar Astrophysics (Гонконг, Китай, 1997), на Генеральной ассамблее Европейского геофизического общества (Ницца, Франция, 1998), на конференциях “Physics for the 21st Century” (Рим, Италия, 2000) и “Актуальные проблемы внегалактической астрономии” (Пушино, 2001).

**Публикации.** Основные результаты диссертации опубликованы в 21 работе; их список приведен в конце автореферата.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы и трех приложений. Общий объем диссертации оставляет 307 страниц, включая 71 рисунок и 5 таблиц. Список литературы включает 237 наименований.



## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность темы диссертации, указаны основные цели работы, кратко изложена структура диссертации, охарактеризована научная новизна, а также научная и практическая значимость работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** рассмотрены различные стационарные модели ударных волн в гравитирующем газе в случаях, когда собственная гравитация газа незначительна по сравнению с воздействием на газ внешнего гравитационного поля. Исследуются особенности стационарного течения газа с ударной волной через гравитационную потенциальную яму конечной ширины. Примерами такого рода систем служат галактические ударные волны или ударные волны в аккреционных течениях.

Основополагающую роль во всей работе играет модель стационарного протекания газа с ударной волной через гравитационную потенциальную яму. Эта модель, введенная и исследованная в параграфе 1.1 как модель плоского адиабатического течения, в дальнейшем последовательно усложняется на предмет учета различных факторов, влияющих на структуру течения: нагрев и охлаждение газа посредством взаимодействия с излучением (параграф 1.2), конечная толщина газового диска (параграф 2.3), вращение (параграф 3.2), неплоская геометрия течения (параграф 4.2).

Исследование характера стационарного адиабатического протекания газа с ударной волной через гравитационную яму конечной ширины (параграф 1.1) в плоской геометрии потока выявило наличие ограничений на возможное расположение ударного фронта в потенциальной яме. В окрестности дна ямы при глубине, превышающей некоторую критическую величину, возникает область, запрещенная для стационарного расположения в ней ударного фронта, что является проявлением своеобразного одномерного эффекта Бернулли. Выделенным является поло-

жение ударного фронта на передней относительно потока стороне ямы на границе запрещенной области, что согласуется как с численными расчетами структуры ударных волн различными авторами [1,13,14], так и с наблюдениями [15,16].

В параграфе 1.2 рассмотрено влияние тепловых процессов на структуру течения газа в гравитационной яме. Учтены эффекты охлаждения газа за счет объемных радиативных потерь и нагрев фоновым рентгеновским излучением или космическими лучами. Предполагается, что баланс нагрева и охлаждения допускает существование одной или двух устойчивых фаз. Показано, что для галактических ударных волн справедливо приближение быстрой релаксации газа к тепловому равновесию за времена малые по сравнению с характерным динамическим временем протекания газа через потенциальную яму; газ в этом случае можно приближенно рассматривать как политропный с эффективным показателем адиабаты  $0 < \gamma_e < 1$ . В пределе мгновенной релаксации газа к тепловому равновесию имеет место эффект неограниченного роста плотности газа в окрестности дна потенциальной ямы по мере приближения глубины ямы к некоторой пороговой отметке. Этим может объясняться эффект “аккреционной волны”, известный по численным расчетам ряда авторов [13,17].

Эффекты влияния конечной толщины газовых дисков на динамику ударных и нелинейных волн изучены в главе 2.

В параграфе 2.1 изложен метод квазидвумерного описания длинноволновых возмущений в тонких газовых дисках. Предложенный метод обобщает традиционные квазидвумерные модели тонких дисков (альтернативные формулировки квазидвумерной модели см. в [18]). Основная его отличительная черта – возможность учета инерции вертикальных движений для тех мод колебаний, для которых характерное время установления вертикального гидростатического равновесия в диске сравнимо с периодом колебаний в продольном по отношению к диску направлении или превышает его. Кроме того, метод позволяет

в принципе учесть многомодовые, в том числе изгибные движения и рассматривать небаротропные течения, в том числе ударные волны.

В основе метода лежит идея замены трехмерных уравнений газодинамики на бесконечную систему зацепляющихся двумерных уравнений для моментов, вычисляемых по распределению всех физических параметров течения вдоль вертикальной координаты в диске. Предложено в конкретных расчетах расцеплять получающуюся систему на некотором конечном моменте и рассматривать приближенное решение для укороченной системы. В нулевом порядке для невращающегося диска получаются уравнения стандартной квазидвумерной модели.

В параграфе 2.2 продемонстрирована сходимость приближенного решения к точному с увеличением порядка укороченной системы на примере линейных волн в диске. Показано, что предложенный метод естественным образом разрешает моды неакустического спектра: гироскопические и внутренние гравитационные.

В параграфе 2.3 изучено влияние эффектов конечной толщины диска на структуру бегущих нелинейных и ударных волн. Баланс дисперсии, обусловленной конечной толщиной диска, и нелинейности приводит к существованию стационарных бегущих волн конечной амплитуды в диске. Показано, что в модели стационарного течения тонкого газового слоя с ударной волной через гравитационную яму, расположенную в плоскости диска поперек потока, возникает резонансное взаимодействие между осциллирующим, выведенным из состояния гидростатического равновесия за фронтом ударной волны потоком и потенциальной ямой, что приводит к расширению областей запрещенного положения ударного фронта в яме.

**Глава 3** посвящена изучению устойчивости течений с ударными волнами, при этом исследуются на устойчивость стационарные модели, рассмотренные в первой главе, и их обобщения.

В параграфе 3.1 развита теория резонансного происхождения неустойчивости ударных волн в неоднородных средах. Математическую

основу теории составляет разложение малых линейных возмущений за фронтом ударной волны по системе характеристических переменных, что позволяет обобщить понятие коэффициента отражения и трансформации звука на ударном фронте, известного в случае однородной среды [19-21], на случай неоднородного потока. В рамках такого подхода можно определять условия и параметры спонтанного излучения ударным фронтом волн. Показано, что ударный фронт, устойчивый в однородном потоке [19-21], способен спонтанно излучать неустойчивые колебания в неоднородном потоке. Собственные частоты колебаний ударной волны определяются с учетом переотражения отходящих от фронта ударных волн в неоднородном зафронтовом потоке. Для слабо неоднородных сред собственные частоты мало отличаются от частоты спонтанного излучения. Анализ коэффициентов отражения звука на ударном фронте в неоднородном потоке позволяет, таким образом, делать качественные оценки относительно устойчивости ударного фронта без решения дифференциальной задачи на собственные значения.

Предсказываемая в рамках такого подхода неустойчивость галактической ударной волны на задней и устойчивость на передней стороне потенциальной ямы (см. параграф 1.1) подтверждается линейным анализом, представленным в параграфе 3.2.

В параграфе 3.3 представлены результаты линейного анализа модели галактической ударной волны с учетом эффектов вращения диска в рамках приближения туго закрученной спиральной волны плотности [1]. Подчеркивается, что сдвиговый характер течения способствует сжатию разрешенных областей расположения стационарной ударной волны в потенциальной яме.

В параграфе 3.4 исследуется устойчивость ударной волны в среде с быстрой релаксацией к тепловому равновесию. Показано, что ударный фронт способен неограниченно долго спонтанно излучать незатухающие нейтральные звуковые колебания и в этом смысле он устойчив.

Глава 4 посвящена анализу устойчивости сферически симметричных аккреционных течений на компактный гравитирующий объект.

В параграфе 4.1 приведены результаты линейного анализа пространственной устойчивости стационарной сферической адиабатической аккреции, описываемой решением Бонди [22], по отношению к вынужденным колебаниям. Рассмотрен отклик всех допустимых видов течения – дозвукового (докритического) и трансзвукового (критического) – на возмущение заданной частоты, генерируемое расположенным на некотором расстоянии от аккретора источником. Показано, что относительно радиальных возмущений оба типа течения пространственно устойчивы, в то время как амплитуда нерадиальных возмущений неограниченно нарастает при приближении к центру аккреции. Обсуждается возможность образования сферической ударной волны в режиме критической аккреции в результате развития найденной неустойчивости и, как следствие, возможность детектирования одиночных черных дыр (возможность образования сферической ударной волны при наличии мелкомасштабного магнитного поля высказывалась в [23]).

В параграфе 4.2 анализируется устойчивость стоячей сферической ударной волны в режиме аккреции, когда зафронтное течение трансзвуковое и адиабатическое. Показано, что ударная волна безусловно неустойчива относительно радиальных колебаний. С увеличением расстояния между ударным фронтом и звуковой поверхностью неустойчивыми могут становиться нерадиальные гармоники с мультипольным номером  $l > 0$ . Показано, что неустойчивость имеет локальную природу, физический механизм неустойчивости – спонтанное излучение ударной волны неустойчивых колебаний в неоднородном потоке. Обсуждается возможность связи квазипериодических осцилляций светимости ряда рентгеновских источников, наблюдаемых в тесных двойных системах типа AM Her, с найденной неустойчивостью ударной волны.

Нестационарные ударноволновые течения в приложении к задачам

динамики межзвездных облаков рассмотрены в главе 5. С помощью численного гидродинамического моделирования изучен процесс кумулятивного сжатия облака ударной волной, индуцируемой эффектами теплопроводности или прогрева облака проникающим ультрафиолетовым излучением. Эта задача рассмотрена в контексте развития теории фотоиндуцированного звездообразования [24]. Показано, что как тепловая волна, так и волна прогрева излучением генерируют в облаке фокусирующуюся ударную волну, способную приводить к сильному сжатию вещества в центре облака, что может инициировать гравитационное сжатие облака и последующее звездообразование.

Глава 6 посвящена изучению динамики в расширяющейся вселенной пространственно локализованных возмущений, характерный размер которых превышает джинсовский масштаб. Используется гидродинамическое приближение для описания возмущений.

В параграфе 6.1 представлены результаты линейного анализа гравитационной устойчивости волновых пакетов на невозмущенном плоском фоне. Невозмущенная среда моделируется столкновительным совершенным газом с показателем адиабаты  $\gamma$ . Показано, что стандартный критерий гравитационной неустойчивости для линейных плоских волн ( $\gamma > 4/3$ ) [25] должен быть пересмотрен на случай волнового пакета. Последний неустойчив в случае  $\gamma > 6/5$ . Показано также, что при  $\gamma > 6/5$  на линейной стадии мультипольные гармоники, по которым может быть разложено возмущение, асимптотически приобретают автомодельный закон расширения  $r \sim t^n$ , определяющийся их орбитальным числом  $l$  и радиальным волновым числом  $n$ . Структура произвольного локализованного возмущения асимптотически определяется собственной функцией, отвечающей наиболее быстро растущей гармонике с определенными значениями  $l$  и  $n$ . Наиболее быстро растущими являются монополярная мода  $l = 0, n = 0$  ( $\eta = 8/9$ ), отвечающая ненулевой массе возмущения, и дипольная мода  $l = 1, n = 0$  ( $\eta = 5/6$ ). Указывается, что соответствующий автомодельный закон расширения

возмущения должен иметь место и после выхода на нелинейную стадию расширения.

В п. 6.2 приведен детальный анализ динамики и структуры нелинейных сферических возмущений положительной энергии ( $l = 0$ ,  $n = 1$ ) в плоской вселенной. Возмущение имеет вид тонкой оболочки, отделенной от невозмущенного течения сильной ударной волной. Приведенный анализ решения является более подробным, нежели в [26]. Обсуждается возможность образования подобных космологических ударных волн при  $Z < 10^3$  как следствие взрывных процессов в ранней вселенной.

В п. 6.3 изучена динамика сферических возмущений положительной энергии в открытой вселенной. Построено инвариантное решение для расширяющейся космологической ударной волны. Показано, что возмущение асимптотически 'вмораживается' в невозмущенный фон, оставаясь при этом сильной ударной волной.

Аналогичное инвариантное решение для космологической ударной волны в модели с доминирующим влиянием темной материи приведено в параграфе 6.4.

В заключении перечислены основные результаты, полученные в диссертационной работе.

В приложении I определяется направление распространения плоских акустических волн с комплексными частотами. В приложении II приведена классификация особых точек системы автономных уравнений динамики самогравитирующего газа в сферически симметричном случае. Приложение III содержит сводку результатов групповой классификации уравнений газодинамики совершенного газа, движущегося в поле собственного тяготения и во внешнем гравитационном поле.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Основные результаты, полученные в диссертации, могут быть сформулированы следующим образом.

1. Построена гидродинамическая модель течения межзвездного газа в диске спиральной галактики в гравитационном поле спиральной волны плотности звездного населения. Проанализированы особенности стационарного течения с образованием галактической ударной волны. Ударная волна не может находиться в стационарном состоянии в конечной области вблизи дна ямы, если глубина ямы превышает некоторую критическую величину, определяемую числом Маха натекающего потока. В этом случае ударный фронт должен устанавливаться на передней стороне ямы по отношению к натекающему потоку на границе разрешенной области.

2. Развита метод квазидвумерного гидродинамического описания тонких газовых дисков. В рамках предложенного метода адекватно описываются любые моды колебаний в диске, в том числе те, для которых условие быстрой релаксации к вертикальному гидростатическому равновесию, – необходимое условие традиционных квазидвумерных моделей – не выполняется. Одновременно с этим возможен корректный учет многомодового характера колебаний в диске и небаротропности течения в диске при наличии ударных волн.

3. Развита теория резонансного происхождения неустойчивости ударных волн в неоднородных средах. Показано, что неоднородность потока (наряду с термодинамическими характеристиками среды и числом Маха) управляет излучательными свойствами ударного фронта. При определенных условиях неоднородность потока приводит к излучению ударным фронтом неустойчивых волн.

4. Рассчитана устойчивость галактической ударной волны в различных моделях с учетом эффектов вращения газового диска и взаимодействия вещества с излучением. Учитываемые факторы усиливают



ограничения на допустимое расположение ударной волны в гравитационной яме. Линейным анализом подтверждается выделенность положения фронта на передней стороне ямы.

5. Найдена неустойчивость сферической адиабатической безударной аккреции газа на компактный гравитирующий объект относительно внешних вынуждающих возмущений. Данная неустойчивость должна приводить к эффективной термализации течения при сферической аккреции и, как следствие, к возможному детектированию одиночных компактных гравитирующих объектов.

6. Обнаружена и исследована неустойчивость сферической ударной волны, образующейся при аккреции газа на компактный объект. Данная неустойчивость может быть ответственна за переменность блеска квазипериодических рентгеновских источников в тесных двойных системах.

7. Рассчитана динамика кумулятивного сжатия межзвездного облака фокусирующейся ударной волной, инициируемой разогревом фоновым ультрафиолетовым излучением или эффектами теплопроводности на межфазной границе. Сильное сжатие вещества в центре облака способствует ускоренному звездообразованию, что может в конечном итоге приводить к установлению автоволнового процесса индуцированного звездообразования в межзвездной среде.

8. Выведен критерий гравитационной неустойчивости локализованных возмущений конечных размеров в расширяющейся вселенной. В модели плоской вселенной, представляющей собой политропный газ с показателем адиабаты  $\gamma$ , при  $6/5 < \gamma < 4/3$  в спектре уединенного возмущения развивается гравитационная неустойчивость конвективной природы, в то время как плоская волна при таких значениях  $\gamma$  абсолютно устойчива.

9. В результате развития гравитационной неустойчивости произвольное уединенное возмущение, расширяющееся в режиме без обострения, асимптотически трансформируется в одну из бесконечного

набора характерных структур. Закон расширения структур автомоделен, а профиль возмущения универсален и определяется двумя целыми волновыми числами – орбитальным моментом  $l$  и радиальным числом  $n$ . Доминирующей структурой для возмущения со скомпенсированной массой является диполь ( $l = 1, n = 0$ ).

**Основное содержание диссертации** опубликовано в следующих работах:

1. Коваленко И. Г., Шекинов Ю. А. Взрывной сценарий происхождения звезд населения III //Астрофизика. - 1988. - Т.29. - С.331-343.
2. Коваленко И. Г. О движении ударной волны, взаимодействующей с облаком //Астрон. циркуляр. - 1989. - N 1535. - С.5-6.
3. Коваленко И. Г. Инвариантные движения гравитирующих сред // Классическая гравифизика. Материалы 2-й Всесоюзной конференции, Волгоград, 1989 г. - Волгоград: Изд. Волгоградского государственного университета. - С.6-7.
4. Коваленко И. Г. Ударные волны в межзвездной среде // Классическая гравифизика. Материалы 2-й Всесоюзной конференции, Волгоград, 1989 г. - Волгоград: Изд. Волгоградского государственного университета. - С.34-35.
5. Kovalenko I., Shchekinov Yu. Heat- and radiative-driven implosion of interstellar clouds. I. Initial dynamics //Astron. Astrophys. Transactions. - 1992. - V.1. - P.129-151.
6. Kovalenko I. G., Levy V. V. Steady gas flow with a shock wave in a potential well //Astron. Astrophys. - 1992. - V.264. - P.406-414.
7. Kovalenko I. G., Sokolov P. A. The nonlinear stage of evolution of spherically symmetric disturbances in an Einstein-de Sitter universe - Explosive and implosive modes //Astron. Astrophys. - 1993. - V.270. - P.1-19.
8. Kovalenko I. G., Levy V. V. Galactic shock waves in a one- or two-phase interstellar medium //Astron. Soc. Pacific: Conference Series.

- 1994. - V.66. - P.127-133.
9. Коваленко И. Г., Еремин М. А. Точечный взрыв в расширяющейся среде // Материалы XI научной конференции профессорско-преподавательского состава (18-22 апреля 1994 года). - Волгоград: Изд. Волгоградского государственного университета. - С.225-228.
  10. Коваленко И. Г. Крупномасштабные удивенные структуры во Вселенной // Гуманитарные и естественные науки в Нижневолжском регионе. Тезисы докладов межвузовской научно-практической конференции студентов и молодых ученых, 5-9 декабря 1994 г. - Волгоград: Изд. Волгоградского государственного университета. - С.115-116.
  11. Еремин М. А., Коваленко И. Г., Лукин Д. В. Устойчивость ударной волны в среде с быстрой тепловой релаксацией // Вестник ВолГУ, Серия: Математика. Физика. - 1996. - Вып.1. - С.95-100.
  12. Kovalenko I. G. Formation and stability of the galactic shock waves // Astron. Astrophys. Transact. - 1997. - V.14. - P.55-60.
  13. Eremin M. A., Kovalenko I. G. A point explosion in a freely expanding medium // Astron. Astrophys. - 1998. - V.335. - P.370-378.
  14. Kovalenko I. G., Eremin M. A. Instability of spherical accretion - I. Shock-free Bondi accretion // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. - 1998. - V.298. - P.861-870.
  15. Eremin M. A., Kovalenko I. G. Instability of spherical accretion with a shock onto a compact object // Astron. Soc. Pacific: Conference Series. - 1998. - V.138. - P.93-96.
  16. Коваленко И. Г., Лукин Д. В. Устойчивость галактической ударной волны: влияние сдвига в потоке // Труды IV съезда астрономического общества. Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга. - 1998. - С.42-47.
  17. Kovalenko I. G., Levy V. V., Lukin D. V. Quasi-two-dimensional modelling of thin astrophysical gaseous disks // Annales geophysicae. - 1998. - Suppl. IV to V.16, Part IV. - P.C1135.

18. Kovalenko I. G., Levy V. V., Mustsevov. V. V. Numerical simulation of instability in rotating shear layer in galactic disks and shallow water experiments //Annales geophysicae. - 1998. - Suppl. IV to V.16, Part IV. - P.C1135.
19. Коваленко И. Г., Лукин Д. В. Ударные волны в астрофизических газовых дисках: эффекты конечности толщины диска и вертикальных движений //Письма в Астрон. журн. - 1999. - Т.25. - С.260-269.
20. Eremin M. A., Kovalenko I. G., Lukin, D. V. Over-reflection and instability of shock waves in an inhomogeneous medium //Astron. Astrophys. Transactions - 1999. - V.18. - P.109-116.
21. Kovalenko I. G., Shchekinov Yu. A. Wavelength limits on isobaricity of perturbations in a thermally unstable radiatively cooling medium //Physics of Plasmas. - 1999. - V.6. - P. 335-342.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Roberts W. W. Large-scale shock formation in spiral galaxies and its implications on star formation //Astrophys. J. - 1969. - V.158. -P.123.
2. Schwarz M. P. The response of gas in a galactic disk to bar forcing //Astrophys. J. - 1981. - V.247. - P.77-88.
3. Mihos J. C., Bothun G. D. NGC 2442: Tidal encounters and the evolution of spiral galaxies //Astrophys. J. - 1997. - V.481. - P.741.
4. Пикельнер С. Б. Ударные волны в спиральных ветвях галактик //Астрон. журн. - 1970. - Т47. - С.752.
5. Shu F. H., Milione V., Gebel W., Yuan C., Goldsmith D. W., Roberts W. W. Galactic shocks in an interstellar medium with two stable phases //1972, Astrophys. J. - 1972. - V.173. - P. 557-592.
6. Chernin A. D. //Mon. Not. Roy. Astron. Soc. - 1999. - V.308. - P.321-332.
7. Buta R., Combes F. //Fund. Cosm. Phys. - 1996. - V.17. - P.95-281.
8. Sawada K., Matsuda T., Hachisu I. Spiral shocks on a Roche lobe overflow in a semi-detached binary system //Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. - 1986. - V.219. - P.75-88.
9. Spruit H. C. Stationary shocks in accretion disks //Astron. Astrophys. - 1987. - V.184. - P.173-184.
10. Ryu D., Brown G. L., Ostriker J. P., Loeb, A. Stable and unstable accretion flows with angular momentum near a point mass //Astrophys. J. - 1995. - V.452. - P.364-378.
11. van der Klis M. //Ann. Rev. Astron. Astrophys. - 1989. - V.27. - P.517.
12. Wakamatsu K.-i. Structure of polar ring galaxies - Shock waves in the gas of polar rings //Astron. J. - 1993. - V.105. - P.1745-1752.
13. Baker P. L., Barker P. K. The interaction of interstellar gas with stellar density wave packets //Astron. Astrophys. - 1974. - V.36. - P.179-189.
14. Martos M. A., Cox D. P. Magnetohydrodynamic Modeling of a

- Galactic Spiral Arm as a Combination Shock and Hydraulic Jump //Astrophys. J. - 1998. - V.509 - P.703-716.
15. Han J. L., Beck R., Ehle M., Haynes R. F., Wielebinski R. Magnetic fields in the spiral galaxy NGC 2997 //Astron. Astrophys. - 1999. - V.348. - P.405-417.
  16. Seigar M. S., James P. A. The structure of spiral galaxies - II. Near-infrared properties of spiral arms //Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. - 1998. - V.299. - P.685-698.
  17. Marochnik, L. S., Berman, V. G., Mishurov, Yu. N., Suchkov, A. A. Large-scale flow of interstellar gas in galactic spiral waves - Effects of thermal balance and self-gravitation //Astrophys. Space Sci. - 1983. - V.89. - P.177-199.
  18. Горькавый Н. Н., Фридман А. М. Физика планетных колец. М.: Наука, 1994.
  19. Дьяков С. П. Об устойчивости ударных волн //Журн. эксперим. теор. физ. - 1954. - Т.27. - С.288-295.
  20. Иорданский С. В. //Прикл. Мат. Мех. - 1957. - Т.33. - С.465.
  21. Ковторович В. М. Отражение и преломление звука ударной волной //Журн. эксперим. теор. физ. - Т.33. - С.1525-1528.
  22. Bondi H. On spherically symmetrical accretion //Mon. Not. Roy. Astron. Soc. - 1952. - V.112. - P.195-209.
  23. Бисноватый-Коган Г. С., Сюняев Р. А. Ядра галактик и квазары как источники инфракрасного излучения //Астрон. журн. - 1971. - Т.48. - С.881-893.
  24. Cammerer M., Shchekinov Yu. Large-scale self-regulation in star-forming systems //Astron. Astrophys. - 1994. - V.283. - P.845-857.
  25. Bonnor W. B. The instability of the Einstein universe //Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. - 1955. - V.115. - P.310.
  26. Ikeuchi S., Tomisaka K., Ostriker J. P. The structure and expansion law of a shock wave in an expanding universe //Astrophys. J.- 1983. - V.265. - P.583-596.



2-

Подписано в печать                      Формат 60х84/16.  
Бумага типографская №1. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 1,3.  
Тираж 120 экз. Заказ 192 .

Издательство Волгоградского государственного университета.  
400062, Волгоград, ул. 2-я Продольная, 30.